

四川盆地元坝地区上二叠统海相凝灰沉积 储层特征

向芳^{1,2},肖倩²,喻显涛²,黄恒旭²,朱祥³

(1. 成都理工大学 油气藏地质及开发工程国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 成都理工大学 沉积地质研究院, 四川 成都 610059; 3. 中国石化 勘探分公司, 四川 成都 610041)

摘要:通过对钻井岩屑和岩心样品的薄片鉴定、扫描电镜和能谱分析、X射线衍射分析及压汞测试,对四川盆地元坝地区上二叠统海相凝灰沉积的岩石学特征、储集空间特征和成岩作用进行了研究。研究发现,凝灰质呈0.1~10.0 mm厚的纹层,与有机质泥岩、炭质泥岩形成纹层状互层夹于生物灰岩、泥灰岩之中,构成凝灰岩、沉凝灰岩和凝灰质沉积岩3种岩石类型。在海水和热液共同作用下,凝灰沉积受到重结晶作用、胶结作用、交代作用、溶蚀作用和充填作用等一系列成岩作用的改造,形成了多种次生岩石类型。酸性热液的加入对凝灰成分产生溶蚀,水-岩反应后再次产生的碱性环境造成(铁)白云石、石膏和少量钠长石、重晶石的充填和交代,同时有利于伊利石或伊/蒙混层粘土的形成和保存,从而形成以微米级凝灰溶蚀孔和纳米级自生粘土矿物晶间孔为特征的孔隙类型。混积泥质和粘土化产物的定向性,以及凝灰沉积中发育的纹层对顺层缝的发育有重要贡献,从而有效改善了岩石的储集性能。

关键词:岩石学特征;成岩作用;储集空间;凝灰沉积;上二叠统;元坝地区;四川盆地

中图分类号:TE122.2

文献标识码:A

Reservoir characteristics of the Upper Permian marine tuffaceous deposits in Yuanba area, Sichuan Basin

Xiang Fang^{1,2}, Xiao Qian², Yu Xiantao², Huang Hengxu², Zhu Xiang³

(1. State Key Laboratory of Oil and Gas Reservoir Geology and Exploitation, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 2. Institute of Sedimentary Geology, Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan 610059, China; 3. Exploration Company, SINOPEC, Chengdu, Sichuan 610041, China)

Abstract: The study focuses on the petrological characteristics, reservoir space characteristics and diagenesis of the Upper Permian marine tuffaceous deposits in Yuanba area, Sichuan Basin based on thin section observation, analysis of scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive spectroscopy (EDS), X-ray diffraction analysis, and mercury intrusion porosimetry (MIP) test. The research results indicate that the tuffaceous deposits interbedding with organic mudstones and carbonaceous mudstones are in laminae of 0.1–10.0 mm thick, and sandwiched within biogenetic limestones or marlstones, which can be classified into tuff, sedimentary tuff and tuffaceous sedimentary rocks. Under the joint effect of seawater and hydrotherm, the tuffaceous deposits have been altered by diagenetic effects such as recrystallization, cementation, metasomasis, dissolution and filling, resulting in a variety of secondary rock types. Acidic hydrotherm can dissolve tuffs and water-rock reaction serves to reproduce an alkaline environment resulting in filling or metasomasis of ferrodolomite/dolomite, gypsum, and a small amount of albite and barite. At the same time, the alkaline environment is also favorable for the formation and preservation of illite or mixed-layer illite/smectite, which in turn stimulates the formation of micrometer-scale dissolved pores in tuffs and nanometer-scale intercrystal pores in authigenic clay. In addition, the directionality of detrital and authigenetic clay minerals, and the existence of laminae in the tuffaceous deposits are conducive to the formation of bedding-parallel fractures, which have effectively improved the

收稿日期:2022-01-13;修订日期:2022-04-28。

第一作者简介:向芳(1974—),女,博士、教授、博士生导师,沉积岩石学、储层沉积学及第四纪地质。E-mail: cdxiangfang@126.com。

基金项目:国家自然科学基金项目(41972101)。

reservoir property of the rocks.

Key words: petrological feature, diagenesis, reservoir space, tuffaceous deposit, Upper Permian, Yuanba area, Sichuan Basin

引用格式:向芳,肖倩,喻显涛,等.四川盆地元坝地区上二叠统海相凝灰沉积储层特征[J].石油与天然气地质,2022,43(4):889-901. DOI:10.11743/ogg20220412.

Xiang Fang, Xiao Qian, Yu Xiantao, et al. Reservoir characteristics of the Upper Permian marine tuffaceous deposits in Yuanba area, Sichuan Basin[J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(4): 889-901. DOI: 10.11743/ogg20220412.

近年来,在日本、古巴、美国、新西兰和土耳其的一些沉积盆地及中国的鄂尔多斯盆地、准噶尔盆地、酒泉盆地、渤海湾盆地、二连盆地和松辽盆地中相继发现了火山碎屑岩储层^[1-16],从而引发了对火山碎屑岩油气勘探的关注,以及火山活动对油气烃源岩、储层影响方面的研究^[17-19]。2013年,三塘湖盆地马朗凹陷中二叠统条湖组二段火山碎屑岩储层的试油成功,证实了新的油藏类型——凝灰岩致密油藏的重要性,并开辟了了三塘湖盆地油气勘探的新领域^[20-21]。在四川盆地,2018年简阳地区的风险探井——永探1井测试获得 $22.5 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产气流,首次在四川盆地二叠系中发现了喷溢相火山碎屑岩气藏,实现了火山岩气藏勘探的重大突破^[22]。近年在永胜1井二叠系爆发相火山角砾岩层段钻遇优质孔洞型储层,见气侵、放空,油气显示良好。在川北元坝地区,2018年钻遇元坝7井茅口组顶部夹沉凝灰岩储层的台缘浅滩碳酸盐岩储层,测得 $105.9 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$ 的高产工业气流^[23]。这些成果表明,四川盆地二叠系火山碎屑岩可能具有较大的勘探潜力。但是,对于四川盆地二叠系海相凝灰岩储层的研究,总体较为薄弱,对储层的孔-缝特征、成岩作用类型、储层控制因素方面的认识都相对不足,从而阻碍了四川盆地二叠系海相凝灰岩油气藏的勘探和开发。

基于此,本文利用薄片鉴定、扫描电镜和能谱分析、X射线衍射(XRD)分析和物性测试等手段,以川北元坝地区上二叠统含凝灰海相混积岩为研究对象,通过对岩屑和岩心的研究,讨论凝灰沉积的储层特征,从而为四川盆地二叠系海相凝灰沉积储层的勘探开发提供参考。

1 区域地质背景及样品测试

四川盆地属于扬子地台的次级构造单元,研究区位于四川盆地北部广元—巴中境内,在构造单元上属于龙门山断褶带、米仓山隆起带和大巴山断褶带所围限的川北低平褶带(图1)。海西晚期,受秦岭洋向川中古陆海侵影响,研究区二叠系沉积了厚约600 m的

海相碳酸盐岩,形成了台地—台地边缘礁滩—斜坡—陆棚的沉积格局^[23]。

研究区二叠系从下至上划分为下二叠统栖霞组、中二叠茅口组和上二叠统吴家坪组,其中茅口组从下至上可细分为茅一段、茅二段和茅三段,吴家坪组从下至上可细分为吴一段、吴二段和吴三段。本文研究的层段主要为上二叠统吴一段至吴二段,整体岩性为一套灰色—灰黑色灰岩夹泥岩、凝灰岩的组合类型(图2)。

由于研究区钻井取心的限制,样品主要为岩屑样,因此本文以位于碳酸盐台地相带元坝2井、碳酸盐斜坡相带元坝3井、元坝6井岩屑样为参考的基础上,重点针对碳酸盐斜坡相带元坝7井中凝灰成分含量较高、深度6 934.72~6 936.75 m的取心段进行研究,共采集岩心样品18件。样品的普通薄片和铸体薄片鉴定在成都理工大学沉积地质专业实验室完成,扫描电镜和能谱分析、岩石物性测试在成都理工大学油气藏勘探与开发重点实验室完成,XRD分析在中国石化石油勘探开发研究院无锡石油地质研究所实验研究中心完成。

2 凝灰沉积的岩石学特征

2.1 宏观特征

岩心中凝灰沉积常常成浅灰色纹层,与深灰色、灰黑色有机质泥岩、炭质泥岩形成纹层状互层,构成韵律层理,纹层厚度一般在0.1~10.0 mm变化(图2b,c,e),总体构成100~200 mm厚的沉积体,夹于生物灰岩、泥灰岩之中(图2a)。测井曲线中,凝灰层段出现LLD(深侧向电阻率值)和LLS(浅侧向电阻率值)相对较低($3 \sim 10 \Omega \cdot \text{m}$),而GR(自然伽马值)和KTH(无铀伽马值)相对较高特征($GR > 75 \text{ API}$, KTH在75 API左右)。岩心中局部可见椭圆形、不规则状岩屑,孤立状分布或出现在正粒序层理下部(图2b,d)。局部可见凝灰质富集层中出现小型砂纹层理。偶见同生小型逆断层将富炭质或有机质纹层明显断开(图2e)。

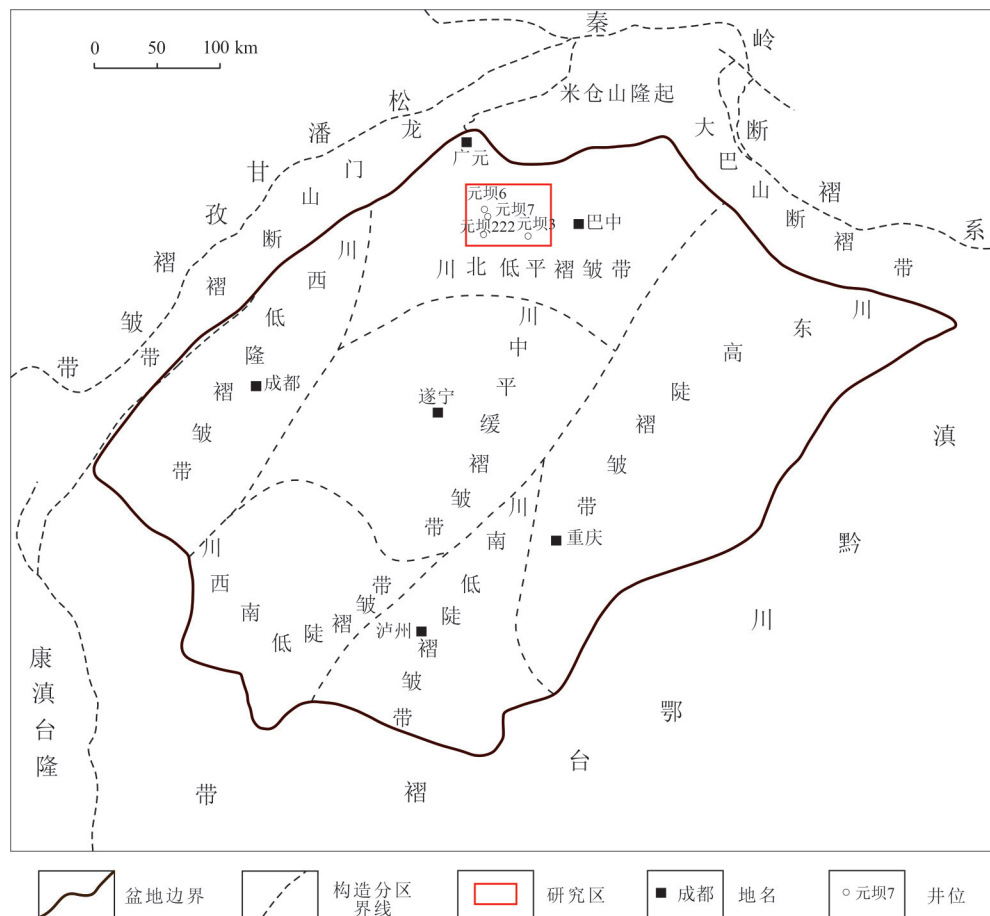


图1 四川盆地构造简图及研究区位置

Fig. 1 Schematic map showing the tectonic background of Sichuan Basin and the location of the study area

对岩屑普通薄片,岩心铸体和茜素红-铁氰化钾混合溶液染色薄片鉴定发现,4口钻井含有凝灰沉积的层段中,凝灰成分多与具有木质结构的炭屑(图3a)、有机质泥(图3b)、白云石和铁白云石(图3c—e)、黄铁矿和少量钠长石(图3c)、方解石共生,成分分布不均匀。凝灰成分包括4种类型,粒径小于0.005 mm的火山尘(图3f—h),粒径大于0.005 mm的岩屑(图3f,i,j)、晶屑(图3f—h,k)和玻屑(图3b,d,e,l)。岩屑的粒径一般大于0.050 mm,最大可达0.500 mm,圆状为主,可见不规则状,成分为流纹岩、凝灰岩岩屑和玻璃质岩屑。晶屑以石英晶屑为主、见少量长石晶屑和云母晶屑,常呈棱角状、碎裂状,粒径在0.100~0.050 mm。玻屑粒径在0.100~0.050 mm,很少见鸡骨状、月牙状等刚性破裂形状,常见塑性玻屑的挤压或者拉长变形。

岩心薄片鉴定结果表明(表1),含有凝灰质的层段中,火山碎屑的含量在10.00%~32.00%,平均为22.25%,碎屑粒径绝大多数小于2.000 mm,且以玻屑为主;其次可见5.00%~30.00%的有机质,14.00%~50.00%的白云石,5.00%~35.00%的炭

屑,4.00%~8.00%的石膏、5.00%~20.00%的黄铁矿。局部层段含有40.00%左右的泥质和5.00%~60.00%的方解石,少量钠长石交代生屑和凝灰,含量约1.00%~4.00%。在灰岩层段中见含量约6.00%~20.00%的自生石英,交代生屑为主。

扫描电镜和能谱研究显示(图4;表2),凝灰沉积整体成层性较好(图4a),可见碎屑来源和自生成因的粘土矿物(图4b—e),主要为伊利石和伊/蒙混层。并可见长石、石英晶屑及炭屑(图4f—h),以及自生成因的(铁)白云石(图4b)、石膏(图4i)、黄铁矿和方解石。

岩心样品全岩XRD分析结果表明(表3),样品中碳酸盐矿物总体可达13.0%~22.1%,其中绝大部分为白云石,少量为方解石,极少量菱铁矿。样品中粘土含量较高,可达43.2%~47.2%。粘土矿物的XRD结果表明(表4),粘土矿物主要为伊/蒙混层粘土,含量高达72.0%~74.0%,其次为伊利石,含量为26.0%~28.0%,不见高岭石和绿泥石。

从薄片鉴定和XRD分析结果来看,大部分岩石中

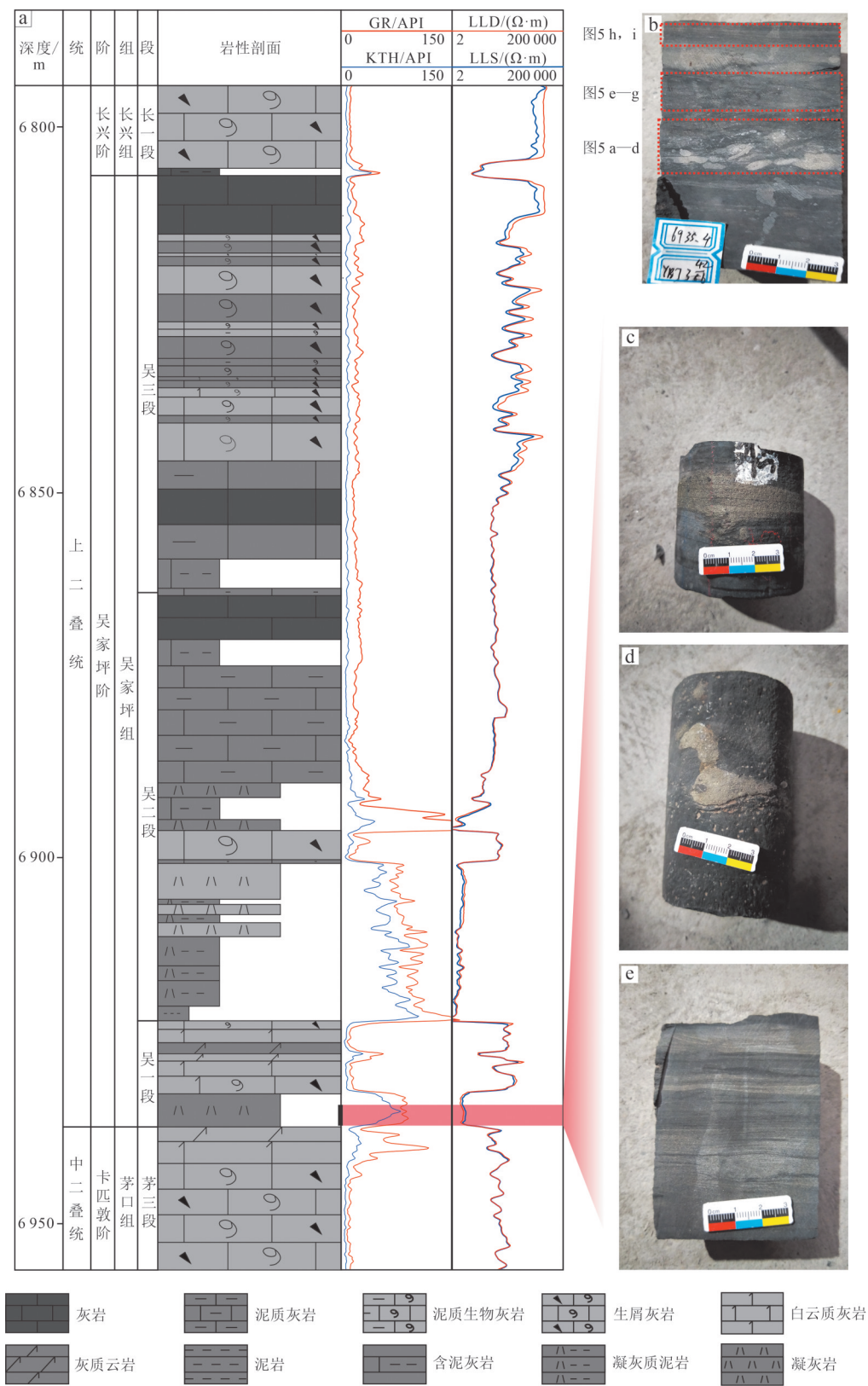


图2 四川盆地元坝7井茅三段—长一段地层特征及岩心样采样部位和特征

Fig. 2 Stratigraphic characteristics of the 3rd member of Maokou Formation to the 1st member of Changxing Formation, sampling locations and characteristics of cores from Well Yuanba 7, Sichuan Basin

a. 地层综合柱状图; b. 岩心中可见两个正粒序,下部粒序层的底部见火山角砾、岩屑及冲刷面,上部粒序层向上出现水平层理,埋深6 935.40 m;
c. 岩心中纹层发育,富黄铁矿透镜体顺层分布,埋深6 935.59 m; d. 黄铁矿化的火山角砾呈水平或直立状,埋深6 936.30 m; e. 小型砂纹层理—水平
层理构成的多个韵律层,下部见同生小断层,埋深6 935.50 m

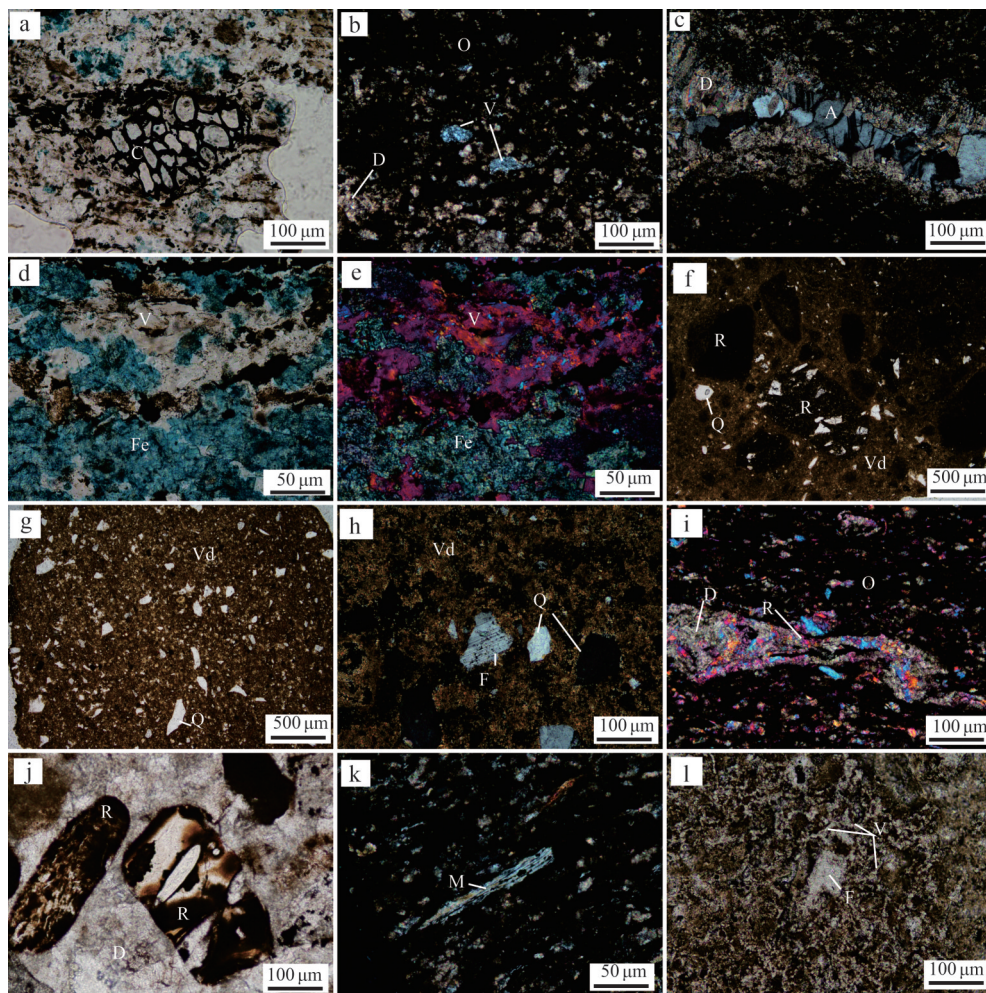


图3 四川盆地凝灰沉积显微特征

Fig. 3 Microscopic features of tuffaceous deposits in the Sichuan Basin

a. 炭屑, 元坝7井, 埋深6 935.56 m, 吴一段, 单偏光; b. 泥质中有机质含量高, 玻屑脱玻化和白云石化, 元坝7井, 埋深6 935.11 m, 吴一段, 正交偏光; c. 生屑白云石化和钠长石化, 元坝7井, 埋深6 935.25 m, 吴一段, 正交偏光; d. 塑性玻屑发生伊利石化, 并被铁白云石交代, 含膏炭质凝灰质粉-细云岩, 元坝7井, 埋深6 935.56 m, 吴一段, 单偏光; e. 同d, 正交偏光(加石膏试板); f. 晶屑岩屑凝灰岩, 见石英晶屑和岩屑, 火山尘胶结, 元坝7井, 埋深6 915.00 m, 吴二段, 单偏光; g. 晶屑凝灰岩, 见石英晶屑和岩屑, 火山尘胶结, 元坝7井, 埋深6 914.00 m, 吴二段, 单偏光; h. 晶屑凝灰岩, 见长石和石英晶屑, 火山尘胶结, 元坝7井, 埋深6 914.00 m, 吴二段, 正交偏光; i. 塑性火山岩屑发生白云石化, 岩石有机质含量高, 元坝7井, 埋深6 935.22 m, 吴一段, 正交偏光(加石膏试板); j. 塑性-半塑性岩屑具有烘烤边, 白云石交代岩石形成凝灰质细晶云岩, 元坝6井, 埋深6 897.00 m, 吴二段, 单偏光; k. 白云母晶屑, 元坝7井, 埋深6 935.22 m, 吴一段, 正交偏光; l. 晶屑玻屑凝灰岩, 见长石晶屑, 玻屑发生脱玻化, 火山尘胶结, 元坝3井, 埋深7 194.00 m, 吴一段, 单偏光

A. 钠长石; C. 炭屑; D. 白云石; F. 长石; Fe. 铁白云石; M. 白云母; O. 有机质; Q. 石英; R. 岩屑; V. 玻屑; Vd. 火山尘

白云石含量较高, 但薄片和扫描电镜观察结果表明, 粉晶以上的白云石(特别是铁白云石)为后期交代成因, 局部仍保留有交代后残余的凝灰成分(图3d, e, j), 表明大部分白云岩的原岩为凝灰岩。

参照曾允孚和夏文杰^[24]、孙善平等^[25]的火山碎屑岩分类命名原则, 将研究区中凝灰沉积划分为3大类: 凝灰岩、沉凝灰岩和凝灰沉积岩。

凝灰岩为凝灰成分多于75%的岩石(图3f—l, 图5a—c)。根据碎屑颗粒的成分可分为: 晶屑凝灰岩、岩屑-晶屑凝灰岩(晶屑-岩屑凝灰岩)、玻屑凝灰岩、

玻屑-岩屑凝灰岩和凝灰岩(颗粒细小, 不能进行具体碎屑颗粒成分鉴定的类型)。同时该岩石类型还包括发生了次生变化, 但可以推测出原岩为凝灰岩的岩石类型(3d, j), 包括: 凝灰质中-细晶云岩(原岩为晶屑-岩屑凝灰岩)、凝灰质泥岩(原岩为粘土化玻屑凝灰岩)、含炭凝灰质不等晶云岩(原岩为含炭玻屑-岩屑凝灰岩)、含灰含有机质凝灰质云岩(原岩为含有机质晶屑-玻屑凝灰岩)、凝灰质中-细晶云岩(原岩为岩屑凝灰岩)和含膏凝灰质细晶云岩(原岩为岩屑凝灰岩)。

沉凝灰岩为凝灰成分在50%~75%的岩石, 根据

表1 四川盆地元坝7井岩心薄片成分鉴定结果

Table 1 Rock components determined by thin section observation for cores from Well Yuanba 7, Sichuan Basin

样品号	井深/m	凝灰成分含量/%			非凝灰成分含量/%								
		岩屑	晶屑	玻屑	有机质	泥质	方解石	(铁)白云石	自生石英	炭屑	石膏	钠长石	黄铁矿
B0	6 934. 72	—	5	15	10	—	50	—	20	—	—	—	—
B1	6 934. 77	5	—	20	—	—	5	40	—	30	—	—	—
B2-1	6 934. 98	—	—	—	—	—	60	14	6	—	—	—	20
B2-2	6 935. 11	—	—	10	30	—	—	50	—	—	—	—	10
B2-3	6 935. 16	—	7	20	10	—	8	40	—	10	—	—	5
B3	6 935. 22	15	—	15	15	—	—	50	5	—	—	—	—
B3-1	6 935. 25	—	6	20	15	—	—	30	—	10	5	4	10
B4	6 935. 38	—	—	25	20	—	—	40	—	15	—	—	—
B5	6 935. 50	—	—	10	—	—	—	47	—	15	8	—	20
B5-1	6 935. 52	—	—	25	10	—	—	35	—	10	—	—	20
B5-2	6 935. 54	—	5	20	10	—	—	40	—	10	4	1	10
B5-3	6 935. 56	—	3	24	—	—	—	30	—	35	6	2	—
B6	6 935. 69	—	5	5	5	45	—	35	—	5	—	—	—
B6-1	6 935. 72	—	5	32	10	—	—	35	—	10	6	2	—
B7	6 936. 01	—	5	15	10	40	—	20	—	5	—	—	5
B8	6 936. 53	—	5	15	10	40	—	15	—	10	—	—	5
B9	6 936. 75	—	5	15	10	40	—	15	—	5	—	—	10

注:“—”表示未检测出含量。

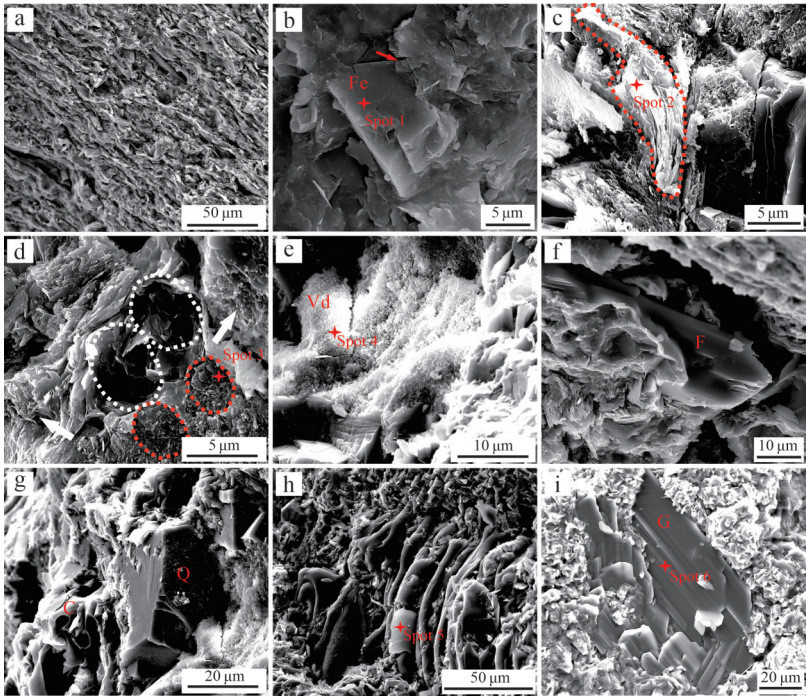


图4 四川盆地元坝7井吴一段岩心样品扫描电镜特征

Fig. 4 SEM features of core samples from the 1st member of Wujiaping Formation in Well Yuanba 7, Sichuan Basin

a. 样品结构疏松,矿物定向排布,纹层明显,埋深6 934. 77 m; b. 碎屑粘土中的铁白云石,埋深6 935. 50 m; c. 伊利石化玻屑,埋深6 935. 22 m; d. 伊利石化岩屑(红色虚线圈位置),泥质重结晶成伊/蒙混层粘土(白色箭头位置),岩屑溶蚀形成铸模孔(白色虚线圈位置),埋深6 935. 22 m; e. 伊利石化火山尘,埋深6 935. 22 m; f. 长石晶屑粘土化,埋深6 934. 77 m; g. 炭屑和石英晶屑,埋深6 935. 22 m; h. 炭屑,埋深6 935. 22 m; i. 石膏,埋深6 935. 22 m
C. 炭屑; F. 长石; G. 石膏; Q. 石英; Fe. 铁白云石; Vd. 火山尘
(红色星形位置为能谱测试位置)

表2 四川盆地元坝7井岩心样品典型成分能谱数据

Table 2 EDS data of typical compositions of core samples from Well Yuanba 7, Sichuan Basin

测试点号	元素的原子数百分比/%												
	C	O	Mg	Al	Si	K	Ca	Ti	Fe	Na	Mn	S	Cl
Spot 1	24.06	60.99	3.61	0.21	0.29	—	7.02	—	3.70	—	0.12	—	—
Spot 2	11.84	60.95	0.85	9.33	13.78	2.28	0.42	0.28	0.27	—	—	—	—
Spot 3	19.19	55.96	0.55	7.39	10.62	1.61	—	—	—	0.34	—	—	—
Spot 4	14.38	47.33	0.86	12.11	19.72	4.73	—	—	0.87	—	—	—	—
Spot 5	85.88	11.02	0.12	0.50	1.07	0.14	—	—	—	—	—	0.11	0.09
Spot 6	13.04	58.38	—	0.52	0.78	—	13.49	—	0.20	—	—	13.59	—

注:能谱测试位置见图4,样品普遍含有机质和炭屑,对能谱数据中C的含量有一定影响;“—”表示未检测出含量。

表3 四川盆地元坝7井全岩XRD分析结果

Table 3 Analytical results of bulk-rock samples by XDR from Well Yuanba 7, Sichuan Basin

岩石类型	样品深度/m	矿物成分含量/%											
		粘土矿物	石英	斜长石	方解石	白云石*	菱铁矿	黄铁矿	重晶石	石膏	硬石膏		
粘土化和云化有机质晶屑-玻屑凝灰岩	6 935.5	47.2	20.8	5.5	1.2	10.1	0.7	13.1	0.3	0.2	0.9		
含凝灰有机质泥岩	6 936.3	43.2	24.6	3.9	0.8	20.8	0.5	5.1	0.3	—	0.8		

注:“*”包括铁白云石;“—”表示未检出含量。

表4 四川盆地元坝7井粘土矿物XRD分析结果

Table 4 Analytical results of clay minerals by XDR from Well Yuanba 7, Sichuan Basin

岩石类型	样品深度/m	粘土矿物类型及相对含量/%							
		蒙脱石	伊/蒙混层粘土	伊利石	高岭石	绿泥石	绿/蒙混层粘土	%S	
粘土化和云化有机质晶屑-玻屑凝灰岩	6 935.5	—	74	26	—	—	—	10	
含凝灰有机质泥岩	6 936.3	—	72	28	—	—	—	10	

注:“—”表示未检测出含量;%S为伊/蒙混层中蒙脱石含量百分比。

成分划分为:含炭含钙晶屑凝灰岩、含云晶屑-岩屑凝灰岩、含膏含炭云质玻屑凝灰岩、含有机质含云岩屑凝灰岩、有机质泥质凝灰岩和含云有机质凝灰岩。

凝灰沉积岩为凝灰成分少于50%的岩石类型,可细分为凝灰质沉积岩(凝灰成分为25%~50%),包括:含炭凝灰质微晶灰岩、含有机质含硅含凝灰生屑灰岩、凝灰质有机质微-粉晶云岩;含凝灰沉积岩(凝灰成分为10%~25%),包括:含凝灰有机质泥岩、含凝灰泥岩、含有机质泥含凝灰粉晶灰岩和含凝灰炭质微粉晶云岩。

2.2 结构和微观构造特征

在定向岩石大薄片(图5),可显示出明显的粒度变化特征:下部(图5a—c)主要为玻屑-岩屑凝灰岩,可见海百合、双壳或腕足等生物碎屑与岩屑、玻屑共生。岩屑主要为早期形成的凝灰岩的破碎产物,主要成圆状或椭圆状,粒径可达1 cm。岩屑和生屑定向性明显,其长径与层面平行。中部(图5d—g)火山碎屑的粒度变细,岩屑和生屑变少,主要为玻屑,含少量晶屑和岩屑。局部出现富凝灰的团块,黄铁矿化明显。

火山碎屑水平定向明显,构成不规则纹层,偶见生屑垂直纹层分布。上部(图3h)纹层明显,出现多个富凝灰层(玻屑为主)和富炭屑层互层,局部出现富黄铁矿团块。顶部纹层密集,炭屑富集成层(图5i)。

3 孔、缝特征

铸体薄片,凝灰层段孔隙较为发育,且多为铸模孔。根据孔隙棱角状和不规则状的外形(图6a—c),推测主要为火山碎屑溶蚀的产物。其次可见炭屑中的原生孔(图6d,e)、凝灰岩中的气孔(图6f)和极少量白云石中的溶孔(图6g)。裂缝较为发育,一般为顺层缝(图6h),其次可见少量网状和斜交层理的裂缝(图6i)。

薄片孔缝鉴定结果表明(表5),薄片总面孔率为1.0%~11.0%,孔隙孤立状,连通性较差。最主要的孔隙为凝灰溶蚀形成的铸模孔,面孔率最高可达10.0%左右,其次为炭屑中原生孔,局部层段可达5.0%,而白云石溶孔的面孔率一般在0.5%~2.0%。薄片中,裂缝的面缝率在0.5%~10.0%。

扫描电镜下,炭屑的原生孔常见,但多为残余状,

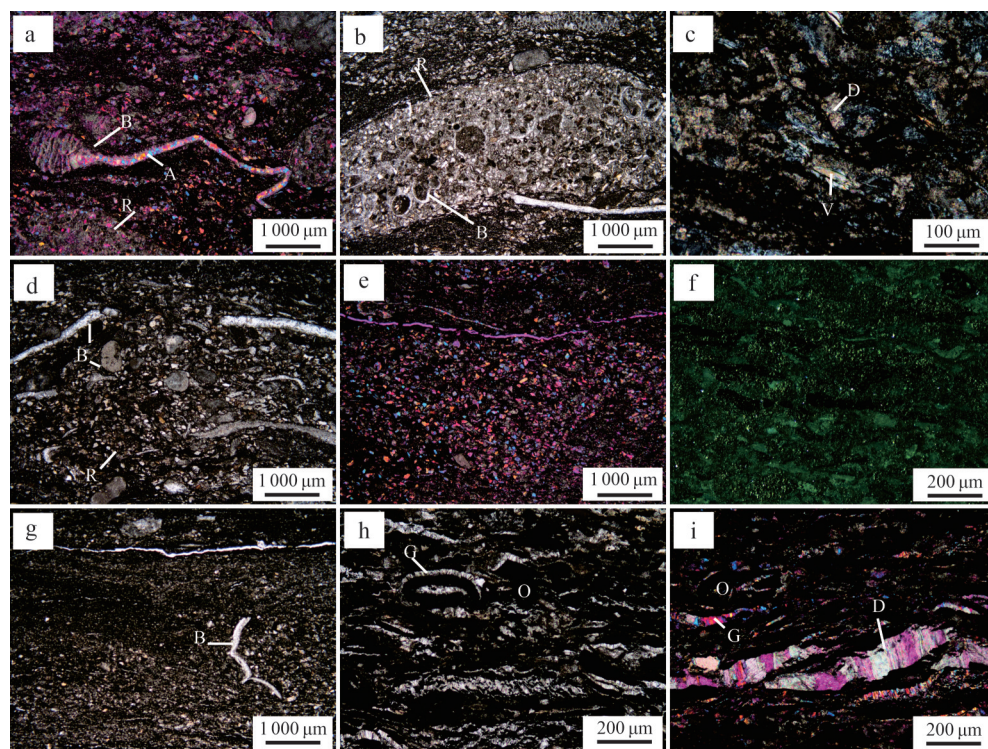


图5 四川盆地元坝7井吴一段埋深6 935.22 m凝灰沉积定向大薄片显微特征(采样位置及特征见图2a,b)

Fig. 5 Microscopic features of tuffaceous deposits by oriented large thin section observation in the 1st member of Wujiaping Formation at a burial depth of 6 935.22 m in Well Yuanba 7, Sichuan Basin (see Fig. 2a, b for the sampling location and features)

a. 玻屑-岩屑凝灰岩,海百合被白云石和钠长石交代,岩屑被白云石交代,正交偏光(加石膏试板); b. 椭圆状的岩屑,长轴平行层面,双壳或腕足、晶屑分布其中,单偏光; c. 玻屑伊利石化,后被白云石交代,正交偏光; d. 生屑和岩屑、晶屑混杂分布,生屑长轴平行层面,单偏光; e. 富凝灰质团块中晶屑含量高,正交偏光(加石膏试板); f. 黄铁矿化显著,单偏光(反光); g. 粒度变细,见垂直纹层的生屑,富凝灰层(浅色)和富炭屑层(深色)不规则互层,单偏光; h. 有机质碎裂,石膏和白云石充填裂缝,单偏光; i. 白云石和石膏充填有机质中的裂缝,正交偏光(加石膏试板)

A. 钠长石; B. 生物碎屑; D. 白云石; G. 石膏; O. 有机质; R. 岩屑; V. 玻屑

被黄铁矿和粘土充填(图7a,b)。火山碎屑溶蚀形成不规则或圆形外形的铸模孔(图4d),局部有粘土矿物残留或充填。可见铁白云石表面形成纳米级微孔(图7c),常见混积粘土矿物和凝灰成分粘土化形成的晶间孔(图7b,d),局部可见混积有机质中的微孔(图7e)。顺层裂缝较为发育,常与粘土矿物集合体的定向方向一致(图7f)。

岩心样品物性测试数据表明(表6),岩石的孔隙度为2.64%~11.60%,渗透率为 $(0.00011 \sim 0.01550) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$,为超低渗储层,对比表5和表6发现,渗透率相对高值层位与薄片裂缝面缝率相对高值层位吻合,且渗透率与孔隙度有一定的相关性,表明孔隙度大的样品相对渗透率更高。

4 主要成岩作用类型及成岩序列

研究结果表明,研究区凝灰沉积发生的主要成岩作用包括5种类型。①重结晶作用:表现为玻屑脱玻

化,形成霏细结构(图3b);早期泥质杂基重结晶形成伊利石和伊/蒙混层(图4d)。②胶结作用:主要表现为火山尘胶结火山碎屑(图3f—h),形成凝灰岩。③交代作用:可见(铁)白云石、黄铁矿和粘土矿物交代岩屑和玻屑(图3d,图3i,图4c,图4d,图8a);钠长石和白云石交代生屑(图3c,图5a)。④溶蚀作用:岩屑和玻屑被溶蚀,形成粒内溶孔和铸模孔(图4d,图6a—c);白云石表面形成微溶孔(图6g,图7c)。⑤充填作用:表现为白云石、石膏、粘土矿物和黄铁矿充填炭屑原生孔(图6d,图6e,图7a);白云石、石膏充填有机质形成的裂缝(图5i);溶孔中发生石膏、方解石和(铁)白云石充填(图6b,图8f)。其中,白云石、粘土矿物和黄铁矿的交代作用,火山尘胶结作用和溶蚀作用是主要的成岩作用类型。石膏的充填和交代作用、方解石充填作用局部较为发育,其他作用类型相对较为少见。

通过薄片和扫描电镜中各种成岩作用形成产物的先后关系,获得研究层段主要成岩研究序列的证据如下:

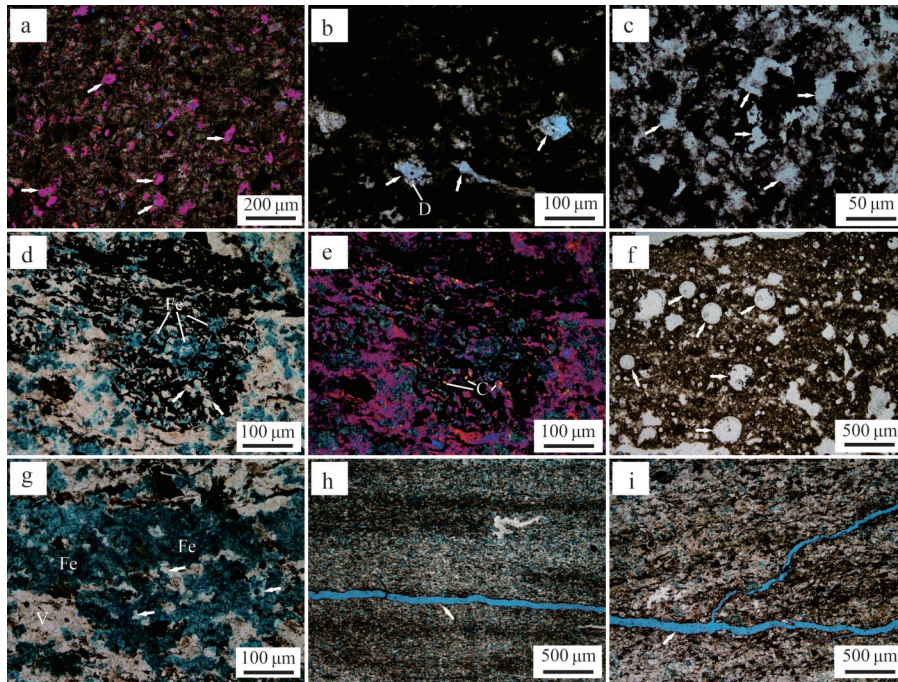


图6 四川盆地元坝7井铸体薄片显微孔、缝特征

Fig. 6 Micrographs showing the pore and fracture features on casting thin sections from Well Yuanba 7, Sichuan Basin

a. 凝灰质微晶灰岩中铸模孔发育,埋深6 914.00 m,吴二段,正交偏光(加石膏试板); b. 白云石部分充填玻屑和晶屑中的溶孔,埋深6 935.50 m,吴一段,单偏光; c. 铸模孔,埋深6 934.77 m,吴一段,单偏光; d. 铁白云石部分充填炭屑中的原生孔,埋深6 935.56 m,吴一段,单偏光; e. 同d,正交偏光(加石膏试板); f. 晶屑凝灰岩中的气孔,埋深6 915.00 m,吴二段,单偏光; g. 交代玻屑的铁白云石发生少量溶蚀(白色箭头位置),埋深6 935.56 m,吴一段,单偏光; h. 顺层缝,埋深6 935.72 m,吴一段,单偏光; i. 斜交纹层的裂缝,埋深6 935.56 m,吴一段,单偏光

C. 炭屑; D. 白云石; Fe. 铁白云石; V. 玻屑

表5 四川盆地元坝7井铸体薄片中的储集空间特征

Table 5 Reservoir space characteristics shown by casting thin section observation from Well Yuanba 7, Sichuan Basin

样品号	井深/m	薄片鉴定岩性	孔、缝类型在薄片中的面积比/%				
			铸模孔	凝灰质溶孔	(铁)白云石溶孔	炭屑残余孔	总面孔率
B0	6 934.72	含有机质含硅含凝灰生屑灰岩	1.00	—	—	—	1.00
B1	6 934.77	凝灰质炭质粉-细云岩(原岩为炭质凝灰岩)	6.00	—	—	—	6.00
B2-1	6 934.98	含云灰岩	—	—	—	—	—
B2-2	6 935.11	含凝灰有机质粉-细晶云岩	—	—	—	—	0.50
B2-3	6 935.16	含灰含有机质凝灰质云岩(原岩为有机质晶屑-玻屑凝灰岩)	—	3.00	2.00	—	5.00
B3	6 935.22	含生屑含有机质含凝灰微晶云岩	—	—	—	—	2.50
B3-1	6 935.25	含膏凝灰质有机质不等晶云岩(原岩为含生屑有机质玻屑-岩屑凝灰岩)	—	—	—	—	5.00
B4	6 935.38	凝灰质有机质微-粉晶云岩	—	—	—	—	5.00
B5	6 935.50	含膏含凝灰炭质粉晶云岩(原岩为炭质玻屑凝灰岩)	—	—	—	—	4.00
B5-1	6 935.52	凝灰质有机质微-粉晶云岩	4.00	—	—	1.00	5.00
B5-2	6 935.54	含膏含有机质含凝灰细-粉晶云岩(原岩为有机质晶屑-玻屑凝灰岩)	—	—	—	—	10.00
B5-3	6 935.56	含膏炭质凝灰质云岩(原岩为炭质玻屑凝灰岩)	—	6.00	0.50	0.50	7.00
B6	6 935.69	含凝灰云质有机质泥岩	2.50	—	—	—	2.50
B6-1	6 935.72	含膏含炭云质玻屑凝灰岩	—	5.00	2.00	—	7.00
B7	6 936.01	含凝灰云质有机质泥岩	10.00	—	—	—	10.00
B8	6 936.53	含凝灰云质有机质泥岩	6.00	—	—	5.00	11.00
B9	6 936.75	含凝灰云质有机质泥岩	7.00	—	—	—	7.00
平均值/%			5.21	4.67	1.50	2.17	6.15

注:“—”表示未检测出含量。

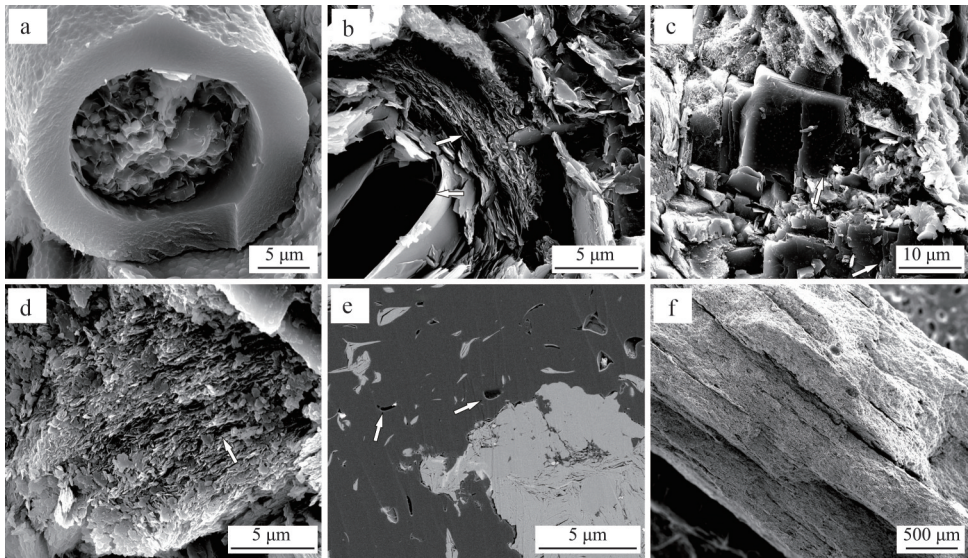


图7 四川盆地元坝7井吴一段岩心中扫描电镜下的孔、缝特征

Fig. 7 Pore and fracture features on SEM images of cores from the 1st member of Wujiaping Formation in Well Yuanba 7, Sichuan Basin
a. 黄铁矿和粘土充填炭屑原生孔,埋深6 935. 11 m; b. 炭屑中的原生孔,粘土化的玻屑,晶间孔发育,埋深6 935. 22 m; c. 铁白云石表面的微溶孔,埋深6 935. 22 m; d. 伊/蒙混层粘土,晶间孔发育,埋深6 935. 50 m; e. 有机质内微孔隙(氩离子抛光),埋深6 935. 69 m; f. 顺层缝发育,埋深6 934. 77 m

表6 四川盆地元坝7井岩心样品压汞孔、渗值

Table 6 Porosity and permeability values obtained by MIP test of the cores from Well Yuanba 7, Sichuan Basin

样品号	井深/m	岩性	孔隙度/%	渗透率/(10 ⁻³ μm ²)
B0	6 934. 72	含有机质含硅含凝灰生屑灰岩	4. 11	0. 000 11
B2-1	6 935. 06	含云灰岩	2. 64	0. 000 19
B2-3	6 935. 16	含灰含有机质凝灰质云岩(原岩为有机质晶屑-玻屑凝灰岩)	7. 29	0. 000 11
B6	6 935. 69	含凝灰云质有机质泥岩	10. 01	0. 015 50
B7-1	6 936. 13	含凝灰云质有机质泥岩	11. 60	0. 000 39

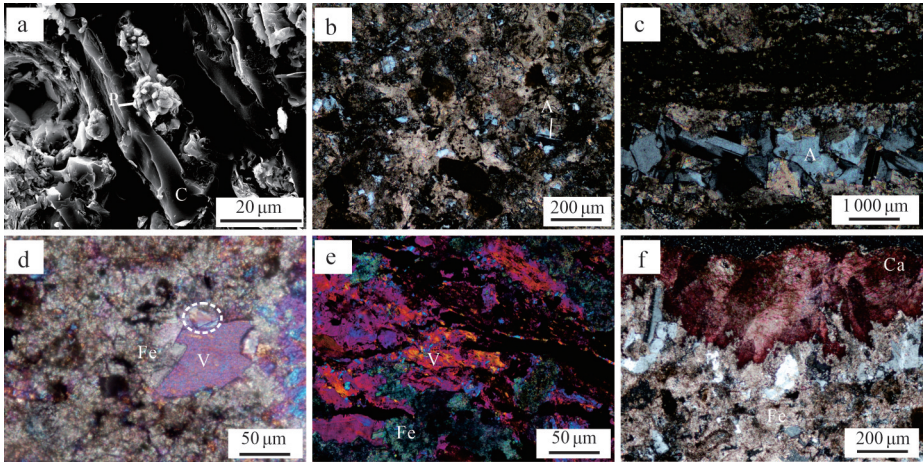


图8 四川盆地元坝地区吴一段—吴二段凝灰沉积主要成岩作用和成岩序列

Fig. 8 Micrographs showing the major diagenetic modifications and diagenetic sequences of the tuffaceous deposits in the 1st and 2nd members of Wujiaping Formation, Yuanba area, Sichuan Basin

a. 生长在炭屑之上的黄铁矿自形晶集合体,元坝7井,埋深6 935. 22 m,吴一段,扫描电镜; b. 钠长石交代火山碎屑,后被(铁)白云石交代,元坝6井,埋深6 897. 00 m,吴二段,单偏光; c. 交代生屑的钠长石被(铁)白云石交代,元坝7井,埋深6 935. 25 m,吴一段,单偏光; d. 脱玻化的玻屑被铁白云石交代,见波状消光白云石(白色虚线圆圈处),元坝6井,埋深6 912. 00 m,吴二段,单偏光(加石膏试板); e. 脱玻化的玻屑被铁白云石交代,元坝7井,埋深6 935. 56 m,吴一段,单偏光(加石膏试板); f. (铁)白云石交代充填溶孔-洞的钠长石,后被充填溶洞的粗晶方解石交代,元坝6井,埋深6 911. 00 m,吴二段,单偏光

A. 钠长石; Ca. 方解石; C. 炭屑; Fe. 铁白云石; P. 黄铁矿; V. 玻屑

1) 10 μm 大小的黄铁矿自形晶集合体普遍可见,并可直接生长在炭屑之上,或充填炭屑中的原生孔(图8a);

2) 交代生屑和火山碎屑或充填溶孔的钠长石被(铁)白云石交代(图8b,c);

3) 脱玻化和粘土化凝灰质被(铁)白云石交代(图8d,e);

4) 凝灰中溶蚀的铸模孔被(铁)白云石充填(图6b);

5) 有机质中形成的裂缝被白云石和石膏充填(图3i);

6) 粗晶方解石交代钠长石和(铁)白云石,可见残余斑块状铁白云石(图8f)。

因此,成岩序列为:首先是黄铁矿形成、凝灰质脱玻化和粘土化;其次为钠长石充填孔隙和交代生屑;再次为(铁)白云石交代凝灰质、钠长石和充填溶孔;最后出现石膏和方解石。由于溶孔中主要充填了钠长石和(铁)白云石以及少量自生粘土,说明溶蚀作用发生在凝灰质脱玻化和早期粘土化作用之后,钠长石和(铁)白云石出现之前。

5 凝灰沉积储层控因讨论

凝灰沉积的孔隙特征表明,研究层位中的孔隙可以分为两种尺度类型。①微米级:主要为凝灰成分形成的溶孔,大小约10~50 μm 。其次为炭屑中的原生孔、凝灰岩中的气孔和极少量白云石中的溶孔。②纳米级:主要为原生和次生粘土矿物间的晶间孔;其次为有机质中的微孔、白云石表面的小溶孔。薄片鉴定结果表明(表5),凝灰成分溶蚀形成的铸模孔和粒内溶孔是最重要的孔隙类型,但这些孔较为孤立,连通性较差。扫描电镜下,纳米级粘土矿物的晶间孔发育,但这些微孔分布在伊利石或伊/蒙混层粘土矿物之间,连通性较差。但是,薄片和扫描电镜特征均表明,岩石中裂缝,特别是顺层缝发育,裂缝既可以成为储集空间,同时也是油气运移的有效通道,因此较高的裂缝面缝率对于提高岩层的储集性具有重要的作用。而混积泥质和粘土化产物的定向性,以及凝灰沉积中发育的纹层可能是造成顺层缝发育的重要原因。

研究层段中,造成孔、缝减少的主要原因是充填作用,薄片和扫描电镜的研究均表明,溶孔和裂缝中的主要充填物是(铁)白云石和石膏,其次为黄铁矿、粘土矿物和少量方解石。郭欣欣等^[26-27]通过 CO_2 流体和碱性地层水对火山碎屑岩改造作用的实验研究证实, CO_2

流体对火山碎屑的溶蚀更有效。自生石膏的形成与含有 H_2S 的酸性热液先期溶蚀火山物质析出钙离子有密切关系^[28]。同时,薄片鉴定发现具有波状消光特征的白云石存在(图8d),全岩XRD表明岩石中存在重晶石,而钠长石化作为热水沉积的标志性矿物在海底热液成岩作用中普遍可见,是海底热液与海水混合后的产物^[29]。因此,本文认为,酸性热液是造成凝灰物质发生溶蚀的原因,并且由于水-岩反应的结果,热液后期变为碱性,从而造成(铁)白云石、石膏和少量钠长石、重晶石的充填和交代。前人的研究认为^[30-33],火山碎屑岩中的伊/蒙混层粘土是火山灰在碱性成岩条件下形成的产物。通过Deconinck等对研究区以西广元朝天剖面中、晚二叠世/早三叠世钾质斑脱岩的研究发现,其成岩温度达到180 $^{\circ}\text{C}$ ^[33],而研究区伊/蒙混层中蒙脱石的含量为10%,按照碎屑岩成岩阶段划分行业标准(SY/T 5477—2003)可知岩石的成岩温度到达140~175 $^{\circ}\text{C}$ 。由此可见碱性热液环境有利于伊利石或伊/蒙混层粘土的形成和保存,因此对粘土矿物中纳米级晶间孔的具有一定贡献。

6 结论

1) 四川盆地元坝地区上二叠统的海相凝灰沉积主要包括3大类:凝灰岩、沉凝灰岩和凝灰沉积岩。其中,凝灰岩包括岩屑凝灰岩、晶屑凝灰岩、玻屑凝灰岩及其过渡类型,同时,由于成岩后生作用强烈,可形成多种次生岩石类型。沉凝灰岩和凝灰沉积岩主要为凝灰与粘土矿物、有机质、方解石等混积形成的岩石类型。

2) 凝灰层段主要的成岩作用包括5种类型:重结晶作用、胶结作用、交代作用、溶蚀作用和充填作用。其中,白云石、粘土矿物和黄铁矿的交代作用,火山尘胶结作用和溶蚀作用是主要的成岩作用类型。

3) 主要孔隙类型包括炭屑中的原生孔、凝灰岩中的气孔、泥质沉积中粘土矿物晶间孔、凝灰成分溶蚀孔、凝灰成分粘土化形成的晶间孔、有机质中的微孔、白云石溶孔,薄片总面孔率为1.0%~11.0%。微米级凝灰成分溶蚀孔和纳米级自生粘土矿物晶间孔构成主要的储集空间。凝灰层段中裂缝较为常见,薄片裂缝面缝率为0.5%~10.0%,裂缝对于改善凝灰质储层的储-渗性非常重要,而混积泥质和自生粘土的定向性以及凝灰沉积中发育的纹层有利于顺层缝的形成。

4) 热液作用对储层的形成具有重要控制作用:酸性热液造成凝灰物质发生溶蚀,对微米级溶蚀孔的形

成具有重要作用。水-岩反应后形成的碱性热液造成(铁)白云石、石膏和少量钠长石、重晶石的充填和交代,造成部分原生孔和溶孔减少。同时碱性热液又有利于伊利石或伊/蒙混层粘土的形成和保存,从而对纳米级晶间孔的形成具有贡献。

致谢:该研究得到了中国石油化工股份有限公司勘探分公司专家和同行的指导和帮助,在此致以衷心的感谢。

参 考 文 献

- [1] Vernik L. A new type of reservoir rock in volcanoclastic sequences [J]. AAPG Bulletin, 1990, 74(6): 830-836.
- [2] Bergman S C, Talbot J P, Thompson P R. The Kora Miocene submarine andesite stratovolcano hydrocarbon reservoir, northern Taranaki Basin, New Zealand [C]// New Zealand Oil Exploration Conference, Proceedings. Wellington: Ministry of Commerce, 1992: 178-206.
- [3] Levin L E. Volcanogenic and volcanoclastic reservoir rocks in Mesozoic-Cenozoic island arcs: Examples from the Caucasus and the NW Pacific [J]. Journal of Petroleum Geology, 1995, 18(3): 267-288.
- [4] Schutter S R. Occurrences of hydrocarbons in and around igneous rocks [J]. Geological Society London Special Publications, 2003, 214(1): 35-68.
- [5] Gecer B A. Diagenesis of Upper Eocene volcanoclastic rocks and its relevance to hydrocarbon exploration in the Thrace Basin, Turkey [J]. Energy Sources, 2006, 28(9-12): 1039-1049.
- [6] Zhang J Y, Liu G D, Cao Z, et al. Characteristics and formation mechanism of multi-source mixed sedimentary rocks in a saline lake, a case study of the Permian Lucaogou Formation in the Jimusar Sag, northwest China [J]. Marine and Petroleum Geology, 2019, 102: 704-724.
- [7] 操应长,姜在兴,邱隆伟. 山东惠民凹陷商741块火成岩油藏储集空间类型及形成机理探讨[J]. 岩石学报, 1999, 15(1): 129-136.
Cao Yingchang, Jiang Zaixing, Qiu Longwei. Study on the type and origin of the reservoir space of igneous oil reservoir in Shang 741 Block, Huimin Depression, Shandong [J]. Acta Petrologica Sinica, 1999, 15(1): 129-136.
- [8] 梁官忠. 二连盆地哈南凝灰岩油藏裂缝发育特征[J]. 石油实验地质, 2001, 23(4): 412-417.
Liang Guanzhong. Fracture development of tuff reservoirs in the Hanan area of the Erlian Basin [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2001, 23(4): 412-417.
- [9] 王金友,张世奇,赵俊青,等. 渤海湾盆地惠民凹陷临商地区火山岩储层特征[J]. 石油实验地质, 2003, 25(3): 264-268.
Wang Jinyou, Zhang Shiqi, Zhao Junqing, et al. Characteristics of volcanic rock reservoirs in the Linshang area of the Huimin Sag [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2003, 25(3): 264-268.
- [10] 苗长盛,徐文,刘玉虎,等. 松辽盆地南部火山岩储层特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2020, 50(2): 635-643.
- Miao Changsheng, Xu Wen, Liu Yuhu, et al. Characteristics of volcanic reservoirs in southern Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2020, 50(2): 635-643.
- [11] 张雪,翁凯,赵晓健,等. 新疆东天山卡拉塔格二叠纪火山岩成因及构造意义[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2021, 51(4): 1119-1138.
Zhang Xue, Weng Kai, Zhao Xiaojian, et al. Permian volcanic rocks in Kalatage area, eastern Tianshan, Xinjiang: Petrogenesis and tectonic implications [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2021, 51(4): 1119-1138.
- [12] 王建伟,鲍志东,陈孟晋,等. 砂岩中的凝灰质填隙物分异特征及其对油气储集空间的影响——以鄂尔多斯盆地西北部二叠系为例[J]. 地质科学, 2005, 40(3): 429-438.
Wang Jianwei, Bao Zhidong, Chen Mengjin, et al. Differentiation of sandstones tuff fillings and its effect on porosity: An example from the Paleozoic sandstones in northwestern Ordos [J]. Chinese Journal of Geology, 2005, 40(3): 429-438.
- [13] 吴运强,常秋生,蒋宜勤,等. 气孔状火山碎屑岩储集层成因特征及油气勘探意义[J]. 新疆石油地质, 2006, 27(2): 166-168.
Wu Yunqiang, Chang Qiusheng, Jiang Yiqin, et al. Genetic characteristics of vesicular volcanic clastic reservoir of Fengcheng Formation in wellblock Xia-72 and its significance for hydrocarbon exploration [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2006, 27(2): 166-168.
- [14] 李军,王德发,范洪军. 甘肃酒泉盆地青西油田裂缝特征及成因分析[J]. 现代地质, 2007, 21(4): 691-696.
Li Jun, Wang Defa, Fan Hongjun. A description of fracture features and its formation mechanisms in Qingxi Oilfield, Jiuquan Basin, Gansu [J]. Geoscience, 2007, 21(4): 691-696.
- [15] 李飞,程日辉,王璞珺,等. 松辽盆地东缘下白垩统营城组二段火山碎屑岩的发育特征[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2009, 39(5): 803-810.
Li Fei, Cheng Rihui, Wang Pujun, et al. Characteristics of volcanoclastic rocks developed in Member 2, Yingcheng Formation, Lower Cretaceous, in the eastern margin of Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 2009, 39(5): 803-810.
- [16] 黄玉龙,王璞珺,邵锐. 火山碎屑岩的储层物性——以松辽盆地营城组为例[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2010, 40(2): 227-236.
Huang Longyu, Wang Pujun, Shao Rui. Porosity and permeability of pyroclastic rocks of the Yingcheng Formation in Songliao Basin [J]. Journal of Jilin University: (Earth Science Edition), 2010, 40(2): 227-236.
- [17] 李长志,郭佩,柯先启,等. 火山活动影响下的碱湖优质烃源岩成因及其对页岩油气勘探和开发的启示[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(6): 1423-1434.
Li Changzhi, Guo Pei, Ke Xianqi, et al. Genesis of high-quality source rocks in volcano-related alkaline lakes and implications for the exploration and development of shale oil and gas [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(6): 1423-1434.

- [18] 刘晓宁,姜在兴,袁晓冬,等. 漆平盆地白垩系细粒火山物质对页岩油气形成的影响[J]. 石油与天然气地质, 2022, 43(2): 390-406.
- Liu Xiaoning, Jiang Zaixing, Yuan Xiaodong, et al. Influence of the Cretaceous fine-grained volcanic materials on shale oil/gas, Luanping Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2022, 43(2): 390-406.
- [19] 黎霆, 诸丹诚, 杨明磊, 等. 热液活动对四川盆地中西部地区二叠系茅口组白云岩的影响[J]. 石油与天然气地质, 2021, 42(3): 639-651.
- Li Ting, Zhu Dancheng, Yang Minglei, et al. Influence of hydrothermal activity on the Maokou Formation dolostone in the central and western Sichuan Basin [J]. Oil & Gas Geology, 2021, 42(3): 639-651.
- [20] 陈旋, 李杰, 梁浩, 等. 三塘湖盆地条湖组凝灰岩致密油藏成藏特征[J]. 新疆石油地质, 2014, 35(4): 386-390.
- Chen Xuan, Li Jie, Liang Hao, et al. Hydrocarbon accumulation elements analysis of Tiaohu tuff reservoir of Middle Permian, Santanghu Basin [J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2014, 35(4): 386-390.
- [21] 马剑, 黄志龙, 高潇玉, 等. 新疆三塘湖盆地马朗凹陷条湖组凝灰岩油藏油源分析[J]. 现代地质, 2015, 29(6): 1435-1443.
- Ma Jian, Huang Zhilong, Gao Xiaoyu, et al. Oil-source analysis of Tiaohu Formation tuff reservoirs in Malang Sag, Santanghu Basin in Xinjiang [J]. Geoscience, 2015, 29(6): 1435-1443.
- [22] 马新华, 李国辉, 应丹琳, 等. 四川盆地二叠系火成岩分布及含气性[J]. 石油勘探与开发, 2019, 46(2): 216-225.
- Ma Xinhua, Li Guohui, Ying Danlin, et al. Distribution and gas-bearing properties of Permian igneous rocks in Sichuan Basin, SW China [J]. Petroleum Exploration and Development, 2019, 46(2): 216-225.
- [23] 胡东风. 四川盆地元坝地区茅口组台缘浅滩天然气勘探的突破与启示[J]. 天然气工业, 2019, 39(3): 1-10.
- Hu Dongfeng. Breakthrough in natural gas exploration in the platform margin shoal at the Maokou Fm in the Yuanba area, Sichuan Basin, and its implications [J]. Natural Gas Industry, 2019, 39(3): 1-10.
- [24] 曾允孚, 夏文杰. 沉积岩石学[M]. 北京: 地质出版社, 1986, 143-151.
- Zeng Yunfu, Xia Wenjie. Sedimentary petrology [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1986, 143-151.
- [25] 孙善平, 刘永顺, 钟蓉, 等. 火山碎屑岩分类评述及火山沉积学研究展望[J]. 岩石矿物学杂志, 2001, 20(3): 313-317+328.
- Sun Shanping, Liu Yongshun, Zhong Rong, et al. Classification of pyroclastic rocks and trend of volcanic sedimentology: A review [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2001, 20(3): 313-317+328.
- [26] 郭欣欣, 刘立, 曲希玉, 等. CO₂流体对火山碎屑岩改造作用的实验研究[J]. 岩石矿物学杂志, 2013, 32(2): 189-196.
- Guo Xinxin, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Experimental researches on the reformation of volcanic clastic rocks by CO₂ fluid water [J]. Acta Petrologica et Mineralogica, 2013, 32(2): 189-196.
- [27] 郭欣欣, 刘立, 曲希玉, 等. 碱性地层水对火山碎屑岩改造作用的实验研究[J]. 石油实验地质, 2013, 35(3): 314-319.
- Guo Xinxin, Liu Li, Qu Xiyu, et al. Experimental study on reformation of volcanic clastic rocks by alkaline formation water [J]. Petroleum Geology & Experiment, 2013, 35(3): 314-319.
- [28] 白玛曲宗, 韦恒叶, 韦雪梅, 等. 恩施剖面G-L界线自生石膏与钠长石成因[J]. 东华理工大学学报(自然科学版), 2017, 40(4): 355-361.
- Bai Maquzong, Wei Hengye, Wei Xuemei, et al. Origin of authigenic gypsum and albite at G-L boundary in Enshi Section [J]. Journal of East China University of Technology (Natural Science), 2017, 40(4): 355-361.
- [29] Mills R A, Elderfield H. Rare earth element geochemistry of hydrothermal deposits from the active TAG Mound, 26° N Mid-Atlantic Ridge [J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1995, 59(17): 3511-3524.
- [30] Fisher R V. Submarine volcanoclastic rocks [J]. Geological Society, 1984, 16(1): 5-27.
- [31] Lanson B, Sakharov B A, Claret F, et al. Diagenetic smectite-to-illite transition in clay-rich sediments: A reappraisal of X-ray diffraction results using the multi-specimen method [J]. American Journal of Science, 2009, 309(6): 476-516.
- [32] Hong D D, Cao J, Wu T, et al. Authigenic clay minerals and calcite dissolution influence reservoir quality in tight sandstones: Insights from the central Junggar Basin, NW China [J]. Energy Geoscience, 2020, 1(1-2): 8-19.
- [33] Deconinck J F, Crasquin S, Bruneau L, et al. Diagenesis of clay minerals and K-bentonites in Late Permian/Early Triassic sediments of the Sichuan Basin (Chaotian Section, Central China) [J]. Journal of Asian Earth Sciences, 2014, 81: 28-37.

(编辑 梁慧)